

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Дерев'янка Олександра Васильовича

"Особливості сплавоутворення при консолідації порошкових матеріалів на основі абразив-металевих систем під дією електричного струму"

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06 порошкова металургія і композиційні матеріали

1. Актуальність теми дослідження.

Отримання матеріалів інструментального призначення для обробки нерудних матеріалів на основі абразив-металевих систем методами електроспінання є одним із сучасних напрямків порошкової металургії, що інтенсивно розвивається. В даному випадку використана технологія спікання під дією електричного струму, яка передбачає використання спрямованого постійного струму.

Для більшості досліджень при консолідації порошкових систем методами електроспінання необхідно досягати достатньо високих температур і застосовувати захисне середовище. Наявність в тілі металевої матриці, що плавиться, твердих включень різної геометрії та природи також може суттєво впливати на процеси сплавоутворення та ущільнення під час електрообробки порошкового матеріалу. В той час, наприклад, для абразив-металевих композицій, де абразивом може слугувати алмаз чи оксид алюмінію, при температурах 500-1200 °C та тривалості процесу в декілька хвилин, процес консолідації може проходити із утворенням рідкої фази під дією електричного струму. Для зменшення температури початку процесу консолідації в склад абразиввміщуючих матеріалів на основі алмазів чи корунду традиційно вводять різної природи активуючі добавки (наприклад, зв'язки на основі Cu-Sn, Cu-Fe, Cu-Al, Cu-Sn-Co-Cr та інше). Це дозволяє отримувати вироби при відносно низьких температурах із утворенням рідкої фази та при малій тривалості самого процесу (всього до декількох хвилин). Але, як свідчать літературні джерела, процеси, що відбуваються в матеріалі при його консолідації безпосередньо під дією електричного струму з утворенням рідкої фази майже не досліджуються.

Тому наукове обґрунтування та експериментальне підтвердження щодо процесів масообміну між поверхнею твердої частинки та прошарком, що утворює рідка фаза (розплав), яка її оточує, визначення механізмів розчинення та взаємодії, що можуть інтенсифікувати процеси масообміну під дією електричного струму між порошковими частинками, що контактують між собою є актуальними науково-технічними завданнями, вирішення якого дозволить суттєво покращити якість абразив-металевих виробів та технологію їх виготовлення.

Робота виконана у відповідності з планами науково-дослідницьких робіт Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича, а сам дисертант був в них виконавцем.

2. Загальна характеристика роботи.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, переліку використаних джерел і 2 додатків. Обсяг роботи становить 8,0 авторських аркушів, які включають 60 рисунків, 28 таблиць та 2 додатки, список використаних джерел із 161 найменування. Автореферат дисертації містить 26 сторінок тексту, в тому числі список із 24 праць, опублікованих за темою дисертації.

У вступі розкрито актуальність обраного напрямку досліджень, суть теми, подано формулювання мети, основних завдань та методів досліджень, визначено наукову новизну отриманих результатів та обґрунтовано їх практичне значення, подано інформацію щодо апробації основних результатів роботи та перелік публікацій по матеріалах дослідження.

У першому розділі за результатами огляду науково-технічної літератури наведено аналіз сучасного стану методів консолідації із використанням дії електричного струму. Описано фізичні явища, які продукуються дією електричного струму в області контактоутворення між порошинками. Вказано, що більшість наукових досліджень сьогодення спрямовані більше на розробку технологічних методів по отриманню композиційних матеріалів при застосуванні технології електроспінання.

Проаналізовано сучасні теоретичні дослідження про поведінку порошкової засипки під дією електричного струму на макро- і мікрорівнях, які описують модель елементарної комірки, що необмежена у просторі. Розглянуто рух розплавленої компоненти при виникненні поля концентрацій та переміщенні речовини коли починається утворення рідкої фази під дією електричного струму.

На прикладі теоретичних і експериментальних досліджень показано під час консолідації порошкових матеріалів під дією електричного струму при утворенні рідкої фази під час спікання разом із температурою на формування структури матеріалу також впливають і сили електромагнітного походження, що виникають під час проходження електричного струму крізь прес-інструмент.

Зроблено висновки, щодо актуальності напрямку досліджень та основні завдання досліджень. Вказано, що дослідження мають основу подальшого розвитку на основі математичного аналізу процесу консолідації під дією електричного струму. Сформульована мета на основі завдання досліджень.

У другому розділі представлені порошкові матеріали відповідно до завдання дослідження, що використовували при моделюванні, та які входять до складу абразиввміщуючих матеріалів інструментального призначення.

Подано опис прес-інструменту та устаткування, що використовувалося для отримання зразків дослідження під дією електричного струму. Змальовано методику, що була відпрацьована при проведенні досліджень по отриманню алмазвміщуючого композиту на мідно-кобальтовій зв'язці (мас.%) ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм).

Описано устаткування і методику, що розроблені в ІПМ НАНУ по випробовуванню алмазвміщуючих композиційних матеріалів на визначенню абразивної здатності по граніту та мармуру за методом зішліфовування, що відповідає ГОСТ 25594-83.

Третій розділ присвячений проведенню теоретичного аналізу щодо впливу постійного електричного струму на складники порошкової системи при спіканні, який показав, що у разі відмінності електропровідності поверхні твердої частинки, як компоненти дисперсного тіла, від електропровідності рідкого оточення, по об'єму прошарку ініціюється направлене переміщення речовини за рахунок дії на частинку електромагнітної виштовхувальної сили, яку іноді називають квазіархімедовою силою електромагнітного походження.

Експериментально виявлено та показано на основі математичних розрахунків, що виникнення переміщень під дією спрямованого постійного електричного струму відбувається вже при дуже малих значеннях числа Релея у 62,2-78,7 на відміну від звичайних умов, коли число Релея дорівнює 1707.

Визначено геометрію елементарної комірки, яка знаходиться під дією постійного електричного струму із коефіцієнтом комірки, що є відносна товщина прошарку рідкої фази між частинками та граничні умови вирішення задачі, які враховують вже не тільки обмежаність комірки у просторі, а й взаємне переміщення рідкої фази між комірками. Результати обчислень показали принципову ідентичність накреслення ліній переміщення речовини по прошарку із різними коефіцієнтами комірки ($k=2$ і 4).

Використання формули по обчисленню величини критерія Шервуда, як функції від густини електричного струму по комірці, що є добуток інтегральної величини всіх дифузійних процесів до атомної, показало, що під дією спрямованого постійного електричного струму температура процесу консолідації дисперсного тіла не повинна сильно перевищувати температуру плавлення металевої матриці чи наповнювача. Аналіз отриманих результатів визначив, що за таких температурних умов процеси сплавоутворення в порошковому тілі будуть проходити переважно за рахунок сил електричної природи.

У четвертому розділі наведено приклади експериментальних робіт, які підкреслюють важливість постановки завдання роботи. Проведено визначення особливостей формування структури матеріалів на основі композицій типу метал-метал, що входять до складу металевої зв'язки на основі міді, олова, кобальту, хрому та алмазів (мас.%) ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм) під дією постійного електричного струму при використанні моделі елементарної комірки та моделі поведінки порошкового тіла на макрорівні. При проведенні досліджень твердою сферичною компонентою слугував порошок міді, а в якості матриці, що плавиться і утворює прошарок між твердими компонентами – олово.

З метою обґрунтування ефекту дії електричного струму на порошкову пресовку проведено два різновиди обробки: з проходженням електричного струму; без проходження (муфельна піч). У випадку застосування дії електричного струму в отриманих зразках утворилися інтерметаліди Cu_6Sn_5 і Cu_3Sn без залишків міді за 2 хв тривалості експерименту. Після термообробки у муфельній печі фазовий склад зразків мав залишки міді (Cu), олова (Sn) і інтерметалідів складу Cu_6Sn_5 і Cu_3Sn .

На прикладі систем Ni сплав – Sn та частинки електрокорунду – Sn показано, що під час проходження процесу консолідації тверді частинки за наявності невеликої різниці температури між основою і верхом зразка у $\Delta T \approx 30^\circ\text{C}$ починали пересуватися вгору і одночасно до зовнішньої бічної поверхні зразка. Визначено, що завдяки більшій різниці в електропровідностях між корундом і оловом, на відміну від нікелевого сплаву, ефект пересування до бічної поверхні корундових частинок буде більшим.

Також із метою оцінки результатів математичних обчислень були проведені експерименти по вивченню дії електричного струму на взаємодію між складниками Cu-Al та Ni-Al, що можуть вміщувати склади зв'язок абразивного інструменту. Визначалася величина Sh при заданих параметрах електрообробки. При розрахунку величини критерію Шервуда можна спостерігати, що для Cu-Al різниця електропровідностей складників по модулю майже вдвічі більша ніж для Ni-Al. Це говорить про те, що більших взаємодій у порошковому тілі під дією електричного струму будуть зазнавати складники, які у своєму контакті між собою *матимуть найбільшу різницю електропровідності*.

Отримана розбіжність між експериментальним значенням критерія Шервуда ($Sh=463$) і теоретичним ($Sh=148-183$) насамперед пов'язана із відмінностями у запропонованій в роботі моделю елементарної комірки і реальними умовами проходження процесу консолідації порошкових композицій під дією електричного струму. Розвиток теорії з урахуванням більшої кількості факторів, що впливають на порошкове тіло допоможе без сумніву наблизитися до практичних результатів.

П'ятий розділ присвячено отриманню алмазвміщуючого матеріалу на основі зв'язки із міді, олова, кобальту, хрому (мас.%) ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм) інструментального призначення при використанні спрямленого постійного струму. Проведено дослідження ступеня абразивної здатності по обробці граніту та мармуру і порівняння із зразками промислового отримання.

Дослідна партія зразків була виготовлена за відпрацьованими попередньо технологічними режимами установці ЕРАН 2/1 під дією спрямленого постійного електричного струму. Встановлено, що матеріали на основі алмаз-металева зв'язка (Cu-Sn-Co-Cr) можуть бути отримані при дії струму густиною у $8,28 \times 10^6 \text{ А/м}^2$ та постійному підпресовуванні у 40-60 МПа. Тривалість технологічного циклу отримання зразків склала 3 хв

виходячи із умови практичного закінчення усадження порошкової композиції.

Для алмазвміщуючого матеріалу, де основна взаємодія проходить між Cu-Sn число Шервуда було 1,6-1,8. Це свідчить про швидше проходження процесів взаємодії поверхні твердої компоненти (Cu) і рідкої фази (Sn) під дією електричного струму. Таке значення дозволяє проводити процес консолідації при температурах на 300-400 °C нижче ніж зазвичай і скоротити тривалість електрообробки.

Проведені тестування отриманих алмазвміщуючих матеріалів методом зішліфовування по граніту та мармуру показали середню абразивну здатність по граніту - 0,6931 г/см² хв. мармуру - 3,0806 г/см² хв., що в 1,7-2,3 рази краще аналогів, де металева зв'язка майже чистий кобальт і отримані в промислових умовах ТОВ "ІНСТЕХ" та сегменти марки "ТІТАН" (склад: зв'язка М1+10%Ti).

3. Наукова новизна отриманих в роботі результатів.

В дисертаційній роботі Дерев'янка О.В. отримано ряд важливих наукових результатів. Серед найважливіших з них можна назвати:

1. Вперше запропоновано модель елементарної комірки, яка описує закономірності взаємодії між компонентами металевої зв'язки (Cu-Sn, Ni-Al) на границі переходу поверхня твердої частинки – прошарок рідкої фази (розплав) та модель поведінки порошкової частинки в порошкових матеріалах на основі абразив-металевих систем в процесах спікання під дією постійного електричного струму.

2. Вперше для визначення ступеня проходження процесів масоперенесення речовини із поверхні твердого тіла у прошарок рідкої фази застосовано критерій Шервуда з метою оптимізації режимів отримання композиційних алмазвміщуючих матеріалів з металевою зв'язкою, що проходять з утворенням рідкої фази під дією електричного струму.

3. Вперше виявлено ефект переміщення твердих компонентів металевої зв'язки під дією електричного струму, що починає проходити вже при величині критерія Релея 62,2-78,7 на відміну від його величини у 1707 при застосуванні традиційних методів консолідації порошкових матеріалів.

4. Практичне значення отриманих результатів.

Розвинута в роботі методологія на основі алгоритму розрахунку швидкості переміщення та напрямків розповсюдження розплавленої речовини навколо порошкової частинки, а також визначення ступеня проходження процесів сплавоутворення між компонентами під дією електричного струму дозволяють на основі аналізу знизити час та температуру процесу консолідації абразив-металевих матеріалів інструментального призначення, що забезпечує економію енергетичних ресурсів до 20%.

Проведені автором теоретичні і експериментальні дослідження було застосовано при розробці режимів по отриманню алмазвміщуючих

композитів на основі мідь-олово-кобальт. Отримані матеріали були випробувані на ТОВ "НПК "АГРОПРОМДЕТАЛЬ" (акт від 22 грудня 2020 року) та рекомендовані для виготовлення сегментів інструментального призначення для обробки нерудних матеріалів.

5. Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

За матеріалами дисертації опубліковано 24 наукових праці, із них 10 статей у провідних наукових фахових виданнях, що входять до наукометричних баз даних SCOPUS, Web of Science of Thomson Reuters та ін. та у вітчизняних виданнях, що входять до переліку фахових видань МОН України, 1 патент на винахід, 10 публікацій за матеріалами доповідей на міжнародних конференціях. Автореферат дисертації повністю відповідає основним положенням дисертації. Матеріал у роботі викладено логічно і повністю розкриває поставлену в роботі мету.

6. Оцінка мови, змісту та стилю дисертації.

У роботі є присутніми всі складові частини завершеної дисертації. Автореферат та опубліковані здобувачем статті в фахових виданнях відображають основний зміст і результати дисертаційної роботи. Дисертаційна робота викладена професійно і грамотно. Матеріали дисертації викладено систематизовано та якісно графічно оформлено. Апробація роботи на наукових конференціях та семінарах є достатньою.

7. Зауваження по роботі.

1. В роботі описується процес електророзрядного спікання композиційних матеріалів в присутності рідкої фази. Чи не означає це, що для кожного зразка отриманого таким методом потрібна окрема графітова пресформа?
2. Розгляд сплавоутворення у системі Cu-Sn у Розділі 4 було б доцільно прив'язати до аналогічної фазової діаграми, що дало б змогу більш глибоко пояснити структурні перетворення у отриманих матеріалах.
3. У таблиці 4.1 задекларовані, проте не повністю вказані розміри (ширина і довжина) структурних елементів (Cu_6Sn_5 та Cu_3Sn). Також на структурі (рис. 4.3а) важко зрозуміти де який з цих інтерметалідів знаходиться.
4. Зі структури на рисунку 4.3а можна зробити висновок, що вона має певну анізотропію, проте з опису не зрозуміло, чи корелює основний напрямок пластинчастої інтерметалідної фази з напрямком протікання струму під час електророзрядного спікання.
5. Не зовсім зрозуміло чим обумовлена підвищена зносостійкість одержаних у роботі композитів у порівнянні з промисловими зразками, хоча їх твердість значно вища.
6. Часто по тексту зустрічаються невдалі фрази і обороти, що може бути наслідком некоректного перекладу.

8. Загальний висновок по роботі.

Не зважаючи на відмічені недоліки, подана на відгук дисертаційна робота є закінченою науково-дослідницькою роботою, що містить нові теоретичні започаткування для вирішення науково-технічної задачі, наукового обґрунтування та має експериментальне підтвердження у прискоренні процесів взаємодій між складниками під дією електричного струму при отриманні композиційного матеріалу складу ((40,0% Cu + 11,0 % Sn + 44,0% Co + 5,0 % Cr) + (50,0 % (умовних одиниць) алмазу синтетичного марки АС 200, 400/315 мкм).

Дисертаційна робота Дерев'янка О.В. "Особливості сплавоутворення при консолідації порошкових матеріалів на основі абразив-металевих систем під дією електричного струму" повністю відповідає вимогам пунктів 9, 10 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника" (постанова Кабінету міністрів України від 24.03.2013. №567) та Вимогам до оформлення дисертації (Наказ МОН України від 03.02.2017. №40).

Вважаю, що здобувач Дерев'янка Олександр Васильович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.06 "Порошкова металургія і композиційні матеріали".

Офіційний опонент,
завідувач кафедри "Високотемпературних матеріалів
та порошкової металургії"
Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є. О. Патона,
Національного технічного університету України "Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
МОН України
д.т.н., доцент



Ю.І. Богомол

Підпис д.т.н., доцента,
Богомола Ю.І. засвідчую:
Вчений секретар
КПІ ім. Ігоря Сікорського



В.В. Холявко